

УДК 629.7.085

И.С. АВИЛОВ¹, М.В. АМБРОЖЕВИЧ², В.А. СЕРЕДА²¹ ООО «Научно–промышленные системы», КБ «Взлет», Украина² Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

КОМПЛЕКСНО–СОПРЯЖЕННАЯ МОДЕЛЬ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО НАЗЕМНОГО ПУСКОВОГО УСТРОЙСТВА ЛЕГКОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

С целью интенсификации начальных этапов проектирования наземных пусковых устройств (НПУ) легких беспилотных летательных аппаратов (БЛА) предложены модель и метод расчета основных термогазодинамических и механических характеристик пневматического НПУ. Результаты численных исследований приведены в виде временных срезов 3D–расчетной области. Отмечено преобладающее влияние волновых факторов на работу НПУ. Сделано заключение о возможности усовершенствования рабочего процесса пневматической катапульты путем использования устройства, изменяющего закон тягового усилия.

Ключевые слова: пусковое устройство, беспилотный летательный аппарат, пневмопривод, комплексно–сопряженная модель, численные методы.

Введение

Обширный класс наземных пусковых устройств (НПУ) беспилотных летательных аппаратов (БЛА) представляет собой множество разнообразных катапультных устройств с приводом от импульсных тепловых машин (ИТМ). Фаза ввода в полет критическим образом влияет на облик комплекса с летательным аппаратом, в силу чего динамику старта следует учитывать в числе основных факторов, от которых зависит содержание соответствующих НИОКР. Тем самым определяются роль и место этапа проектирования катапультного устройства, как системы, включающей в себя ИТМ и трансмиссию. В свою очередь, исходя из определения понятия «ИТМ», технология проектирования подобного объекта неизбежно должна отображать быстротечность рабочего процесса. Тем не менее, в стремлении экономии средств на НИР, а зачастую и в силу непонимания природы процессов, при проектировании тепловых расширительных машин в инженерной практике по–прежнему, как и в середине XX в., используются методики расчета, базирующиеся на т.н. «квазистационарной гипотезе», подразумевающей однородность полей параметров внутри расчетных объемов на каждом временном слое, безынерционность рабочего тела, правомочность использования характеристик установившихся режимов течения и т.д. В случае высокой частоты периодического рабочего процесса или при наличии участков тракта с преобладающими волновыми процессами, как это имеет место в

ИТМ, подобные допущения вообще не адекватны физике оригинала.

Тем не менее, достигнутый на данном этапе уровень развития методов вычислительного эксперимента и возможности вычислительной техники создают все необходимые предпосылки для обеспечения должного качества проектирования НПУ с приводом от ИТМ. Для демонстрации указанных возможностей далее представлены модель рабочего процесса в пневматической катапulte для запуска легкого БЛА и результаты численных исследований с акцентом на влияние волновых факторов расширительной ИТМ на динамические характеристики.

Объект исследований и его модель

Пневматические НПУ отличаются высокими показателями энергетического совершенства и уступают только механическим [1], ввиду несколько худшего эффективного КПД привода трансмиссии. Пневматическим катапультам также присущ ряд других достоинств (скрытность запуска, отсутствие прецизионных узлов, простота и экономичность в эксплуатации), что обусловило широкое распространение данного типа НПУ в диапазоне стартовых масс БЛА от 5 до 250 кг.

Объектом исследований являлась пневматическая катапульты для запуска легкого БЛА «Ремез 3–У» разработки НПС КБ «Взлет» (табл. 1, рис. 1)

Основным конструктивными элементами пневматической катапульты являются рабочий цилиндр и механическая трансмиссия – четырехкрат-

ный полиспастный механизм. Разгон БЛА осуществляется по направляющей с помощью стартовой тележки. Для создания необходимого давления в системе используется пневмокомпрессор.

Таблица 1

Основные характеристики пневматического НПУ и параметры режима работы в стартовых условиях

Физический параметр	Значение
Начальное давление в системе, Па	10Е6
Длина направляющей, м	3
Масса запускаемого БЛА, кг	10
Максимальная перегрузка, ед.	3



Рис. 1. Серийный образец пневматической катапульты с БЛА «Ремез-3У» на стартовой позиции

Принципиальная основа комплексно-сопряженной математической модели процессов в пневматическом НПУ аналогична [2, 3]. Модель включает в себя нестационарные пространственные подмодели течения во внутренних и внешних областях контрольного объема с граничными условиями, определяемыми динамикой подвижных агрегатов (рис. 2). Численное решение системы уравнений модели базируется на основе принципа декомпозиции и модифицированной конечно-разностной схеме С.К. Годунова. Факторы разнородной физической природы отображаются источниками-стоками (ИС) массы, импульса и энергии, которые входят в правые части системы уравнений газовой динамики и рассматриваются как возмущения решения однородной подсистемы уравнений. Интенсивности ИС определяются на основе общих или частных форм законов сохранения. Сеточное отображение топологических свойств расчетной области задается поверхностной и твердотельной масками, воспроизводящими тонкостенные и объемные элементы конструкции соответственно. Моделирование утечек осуществляется локализацией на внешней и внутренней поверхностях поршня системы ИС, интен-

сивности которых соответствуют проектным зазорам и локальным состояниям физических полей. Для сопряжения термогазодинамической и механической подмоделей НПУ аналогично [1] используется уравнение Лагранжа II рода как наиболее общий и универсальный инструмент исследований.

Расчет пневматической катапульты проводился на прямоугольной регулярной расчетной сетке из $20 \times 20 \times 170$ ячеек соответственно, с пространственным шагом 5 мм. Расчеты проводились на ПЭВМ класса Pentium 4 с тактовой частотой процессора 2,2 ГГц. Требуемое машинное время для расчета одного рабочего цикла НПУ составило 36 ч.

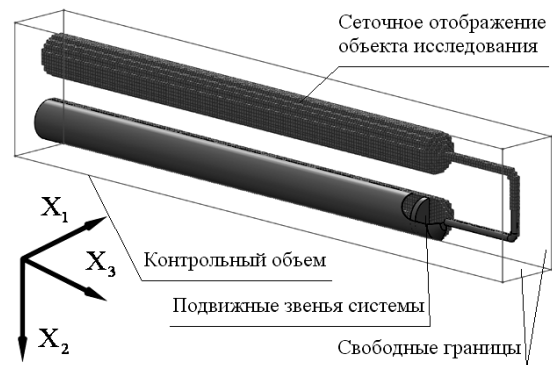


Рис. 2. Структура комплексно-сопряженной модели НПУ пневматического типа

Результаты численного моделирования

На рис. 3 – 5 представлены результаты численного эксперимента в виде временных срезов расчетной области. Фазы процесса характеризуются плоскими срезами мгновенных состояний пространственных физических полей в пневмосистеме. В центральной части отображены механические параметры подвижных элементов. Геометрический образ согласован с фазами работы исследуемых объектов.

Полученные результаты очевидным образом свидетельствуют о том, что квазистационарные представления о процессах в НПУ далеки от действительности. Существенное влияние на динамику старта оказывают распространяющиеся в пневмоцилиндре слабые волны разряжения-сжатия. С точки зрения инженерной практики интерес представляет циклограмма изменения давления по длине цилиндра, позволяющая оценить действующую на БЛА перегрузку и определить скорость движения БЛА по направляющей. Всего наблюдается два пика давления (рис. 4, см. график давления). Первый пик обусловлен подачей сжатого газа в рабочий цилиндр с образованием «жидкого сопла», в котором повышение субстанциональной скорости приводит к снижению давления расширения. Второй пик вызван появлением волны сжатия вследствие замедления движения поршня, что способствует росту давления

и новому ускорению подвижных частей.

Необходимо отметить, что подобные явления в фазе активного такта работы ИТМ не являются недостатком конкретного образца, но имманентно присущи всем НПУ пневматического типа. Более того, указанный результат получен на примере пневматической катапульти с глубоко не рядовыми в своем классе показателями эффективности (рис. 3, на котором в критериальном пространстве представлено развитие энергетического совершенства пневматических НПУ в зависимости от предельно допустимой стартовой перегрузки, где КЭС – критерий энергетического совершенства [5]). Сравнительно высокий уровень данного образца объясняется тем, что запуск относительно недорогого аппарата «Ремез-3У» требует уменьшения перегрузок при сходе аппарата и, тем самым, приводит к минимизации затратной функции с увеличением КПД катапульти. Вообще, наибольший КЭС имеют НПУ, сбалансированные по перегрузке и затратам. При-

мечательно, что в классе пневматических катапульти устоявшегося облика наблюдается линейная зависимость между КПД и перегрузками.

Таким образом, наибольшее давление в цилиндре возникает в точках, приближающихся к крайним положениям поршня. Тем самым обнаруживается несогласованность фаз волнового процесса ИТМ НПУ, для устранения которой, т.е. с целью «сглаживания» циклограммы давления, далее можно целенаправленно провести следующие проектные мероприятия.

Замечено, что после второго пика, падение давления происходит значительно менее интенсивно, поэтому временной разрыв между забросами давления должен быть минимизирован. Сокращение длины цилиндра и повышение кратности полиспафта позволяет повысить число пиков давления до трех так, чтобы второй из них приходился на середину пути поршня, чем обеспечивается рост среднеинтегрального давления в пневмоцилиндре.

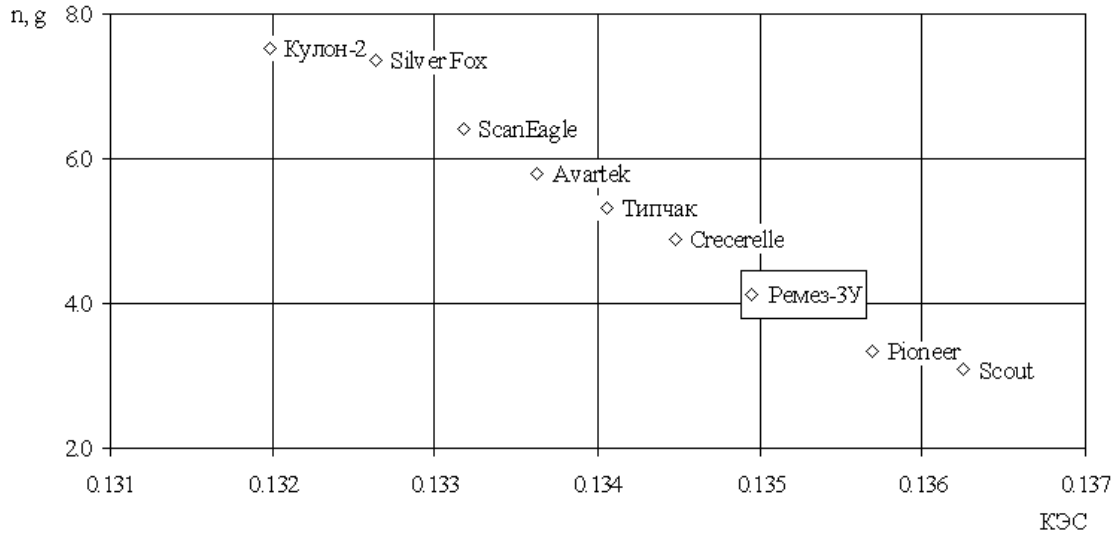


Рис. 3. КЭС пневматических катапульти

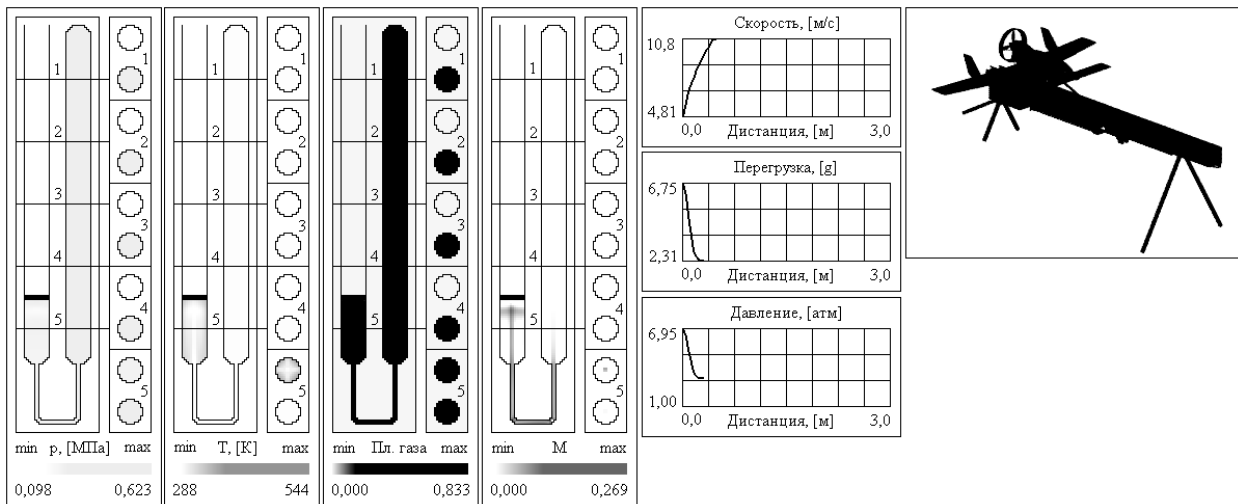


Рис. 4. Фаза подачи сжатого воздуха в рабочий цилиндр и строгивания БЛА

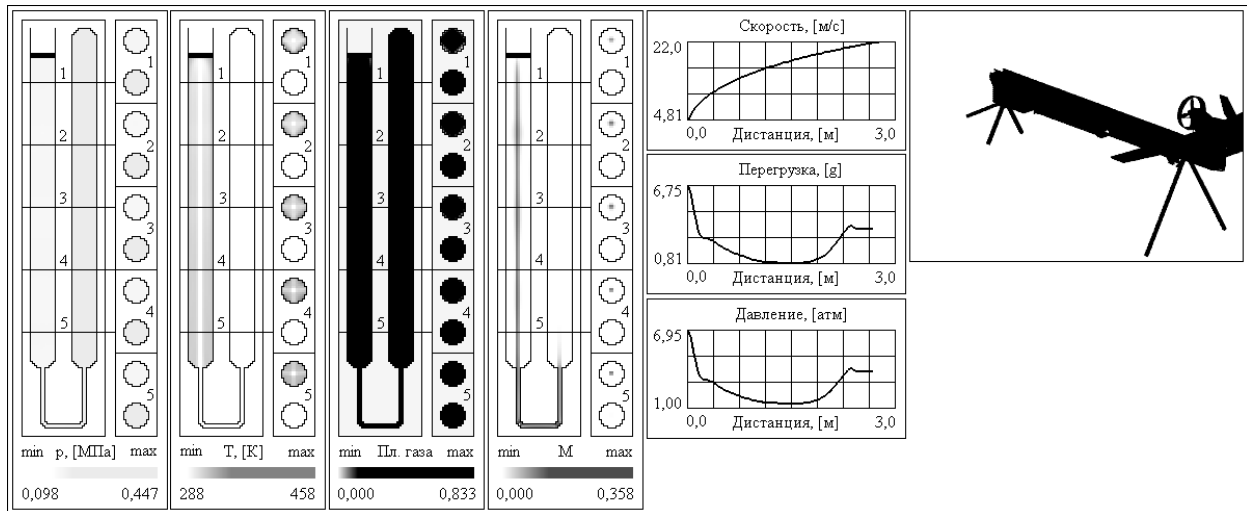


Рис. 5. Фаза наполнения цилиндра и схода БЛА с направляющей

Скорое замедление поршня (а значит и возникновение отраженной от него волны сжатия) после выпуска сжатого газа также имеет место при незначительном снижении давления в баллоне. Следовательно, существует оптимальный исходный уровень давления для конкретного конструктивного исполнения ИТМ и трансмиссии, позволяющий получить максимальное давление в цилиндре.

Изменение закона тягового усилия без варьирования геометрических и энергетических параметров расширительной машины возможно, например, за счет модификации трансмиссии путем внедрения вариатора копирного типа [4], аналогично применяемому на пневматической катапульты фирмой Boeing для запуска БЛА ScanEagle.

Таким образом, внедрение численных исследований позволяет отчетливо выявлять неиспользуемые резервы совершенствования объекта проектирования. В данном случае в качестве резерва может рассматриваться модернизация исходной полиспасной трансмиссии с постоянным передаточным отношением, т.е. не содержащей адаптивного к закону изменения усилия на штоке рабочего цилиндра кинематического звена, позволяющего обеспечить требуемые динамические характеристики движения стартовой тележки по направляющей катапульты. В частности, такого рода звеньями могут выступить вариаторы копирного типа [6].

Здесь следует подчеркнуть, что разработка пневмокатаapult с адаптивными трансмиссиями вне использования технологий опережающего численного эксперимента на основе комплексно-сопряженных моделей рабочего процесса в современных условиях представляется малопродуктивным занятием ввиду сложности и затратности опытной доводки объекта проектирования.

Заключение

Волновые факторы оказывают существенное влияние на протекание рабочих процессов в наземных пусковых устройствах. Высокие субзвуковые скорости внутри рабочего цилиндра пневматической катаapultы снижают ее эффективность за счет снижения давления при истечении расширяющейся в жидком сопле струи нагнетаемого из баллона рабочего тела.

Такого рода спецификой рабочего процесса обуславливается необходимость применения современных методов проектирования, включающих в себя опережающие численные исследования на основе полностью замкнутых комплексно-сопряженных газодинамических и механических моделей рабочих процессов, так как общепринятые в инженерной практике квазистационарные методики расчета подобных устройств представляются не вполне адекватными физике.

Предложенная технология опережающих численных исследований рабочего процесса в пневматической катаapultе ориентирована на использование ПЭВМ ординарного класса и позволяет получить существенно уточненное представление о термодинамических и механических факторах рабочих процессов, что обеспечивает радикальное повышение качества проектирования.

Повышение эффективности наземного пускового устройства с расширительной импульсной тепловой машиной на основе опережающих численных исследований может осуществляться за счет настройки характеристик пневмопривода, влияющих на колебательные явления, а также включения в состав полиспасной трансмиссии вариаторов копирного типа.

Литература

1. Авилов И.С. Критериальные оценки энергетического совершенства пусковых устройств легких беспилотных летательных аппаратов / И.С. Авилов, А.В. Амброжевич, В.А. Серeda // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 2 (38). – С. 15-19.

2. Авилов И.С. Комплексно-сопряженная модель инерционного стартового устройства легкого беспилотного летательного аппарата / И.С. Авилов, А.В. Амброжевич, В.А. Серeda // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 2 (49). – С. 5-8.

3. Амброжевич А.В. Комплексная траекторная модель летательного аппарата / А.В. Амброжевич,

В.А. Серeda // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 5 (52). – С. 40-44.

4. Сведения о НПУ для БЛА «Scan Eagle» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.boeing.com/defense-space/military/scan-agle/index.html>.

5. Серeda В.О. Метод формування вигляду наземних пускових пристроїв безпілотних літальних апаратів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.07.06 / Серeda Владислав Олександрович; Нац. аерокосм. ун-т. ім. М.Є. Жуковського: Х. – 2009. – 20 с.

6. Серeda В.А. Классификация законов распределения тягового усилия наземных пусковых устройств беспилотных летательных аппаратов / В.А. Серeda // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 4 (71). – С. 63-66.

Поступила в редакцию 20.09.2010

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

КОМПЛЕКСНО-СПРЯЖЕНА МОДЕЛЬ ПНЕВМАТИЧНОГО НАЗЕМНОГО ПУСКОВОГО ПРИСТРОЮ ЛЕГКОГО БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

І.С. Авілов, М.В. Амброжевич, В.О. Серeda

З метою інтенсифікації початкових етапів проектування наземних пускових пристроїв (НПП) легких безпілотних літальних апаратів (БЛА) запропоновано модель та метод розрахунку основних термогазодинамічних й механічних характеристик пневматичного НПП. Результати чисельних досліджень наведено у вигляді часових зрізів 3D-розрахункової області. Відзначено переважний вплив хвильових факторів на роботу НПП. Зроблено висновок про можливість вдосконалення робочого процесу пневматичної катапульти шляхом використання пристрою, який змінює закон тягового зусилля.

Ключові слова: пусковий пристрій, безпілотний літальний апарат, пневмопривід, комплексно-спряжена модель, чисельні методи.

COMPLEX-CONNECTED MODEL OF PNEUMATIC GROUND LAUNCHING DEVICE OF THE LIGHT UNMANNED AERIAL VEHICLE

I.S. Avilov, M.V. Ambrozhevitch, V.O. Sereda

With the purpose of an intensification of the initial stages of designing of ground launching device (GLD) of light unmanned aerial vehicle (UAV) the model and a method of calculation of the basic thermo-gas-dynamic and mechanical characteristics pneumatic GLD are offered. Results of numerical researches are resulted as time cuts of 3D-settlement area. Prevailing influence of wave factors on work GLD is marked. The conclusion about an opportunity of improvement of working process of a pneumatic catapult is made by use of the device changing the law of traction effort.

Key words: launching device, unmanned aerial vehicle, air-powered drive, complex-connected models, numerical methods.

Авилов Игорь Сергеевич – директор, главный конструктор ООО «Научно-промышленные системы» КБ «Взлет», Харьков, Украина, e-mail: Kbvzlet@mail.ru.

Амброжевич Майя Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры аэрокосмической теплотехники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Серeda Владислав Александрович – канд. техн. наук, вед. инженер кафедры ракетных двигателей факультета ракетно-космической техники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: sereda_vlad@ukr.net.